



УДК 547.92:577.112

СИНТЕЗ ТЕТРАЭФИРОВ ИНДОЛИЛ-3-УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ С 24-ЭПИБРАССИНОСТЕРОИДАМИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА НАЧАЛЬНЫЙ РОСТ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ

© 2025 г. Р. П. Литвиновская*, #, О. П. Савочка*, Н. Е. Манжелесова*,
А. Л. Савчук*, В. А. Хрипач*

* Институт биоорганической химии НАН Беларусь, Беларусь, 220084 Минск, ул. Купревича, 5/2

Поступила в редакцию 09.12.2024 г.

После доработки 14.12.2024 г.

Принята к публикации 15.12.2024 г.

Обработкой 24-эпибрассиностероидов ангидридом индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) в диоксане в присутствии диметиламинопиридина получены их 2,3,22,23-тетра-(3'-индолилацетокси)-производные. Показано, что брассиностероидные тетраэфиры ИУК проявляют фиторосторегулирующую активность на ранних стадиях роста растений пшеницы. Установлено, что обработка тетраэфирами ИУК приводит к изменению стероид-гормонального баланса брассиностероидов у вегетирующих растений, что может свидетельствовать об их участии в процессах регуляции биосинтеза. Полученные производные перспективны для более глубокого изучения, прежде всего, исследования их эффективности в полевых опытах.

Ключевые слова: брассиностероиды, ИУК, синтез 2,3,22,23-тетраэфиров ИУК и 24-эпибрассиностероидов, ростостимулирующее действие, ИФА, эндогенное содержание брассиностероидов

DOI: 10.31857/S0132342325040086, **EDN:** LNMFRW

ВВЕДЕНИЕ

Брассиностероиды (БС) – последние из открытых к настоящему времени фитогормонов растений, которые, в отличие от ауксинов, цитокининов, гиббереллинов, абсцизовой кислоты и этилена, имеют стероидную структуру [1]. Они проявляют росторегулирующую и адаптогенную активность в низких концентрациях [2–4]. Установлено, что брассиностероиды взаимодействуют со всеми классами фитогормонов и влияют на их баланс в разных растительных объектах [5–7]. В ряде работ отмечен синергизм действия брассиностероидов и других фитогормонов, в частности ауксинов [8, 9]. Некоторое время назад считалось, что для проявления биологической активности необходимо наличие в молекуле БС

2,4,22,23-гидрокси-, 6-кето- или 7-окса-6-кетогрупп и алкильного заместителя при C24. Однако наши работы по синтезу и изучению сложноэфирных производных БС с различными кислотами показали, что их действие часто превосходит эффективность природных БС. Так, производные гидрохлорида 5-аминолевулиновой кислоты с брассиностероидами показали более высокую активность в начальный период роста растений пшеницы, что способствует равномерности всходов [10]. Синтезированные 2-моносалицилаты БС проявили не только более высокую ростостимулирующую активность [11], но и оказали положительное влияние на устойчивость растений к различным видам стресса, превышающую таковую их природных аналогов. На проростках проса, например, показана более высокая эф-

Сокращения: БС – брассиностероиды; ИУК – индолил-3-уксусная кислота; ЭБ – 24-эпибрассинолид (**II**); ЭК – 24-эпикастастерон (**I**).

Автор для связи: (тел.: +375 (17) 356-56-15; эл. почта: litvin@iboch.by).

фективность при тепловом и солевом стрессах (повышение выживания проростков после стрессовых воздействий и уменьшение накопления в них продуктов пероксидного окисления липидов). Действие полученных эфиров заметно превосходило эффекты соответствующих брассиностероидов, салициловой кислоты и смеси этих фитогормонов [12].

В лабораторных опытах выявлено, что салицилаты 24-эпибруссинолида, 24-эпикастастерона и 6-дезоксо-24-эпикастастерона улучшают посевные качества семян ярового ячменя и действуют как индукторы иммунитета растений в условиях биотического стресса [13, 14]. В мелкоделяночных опытах показано, что обработка растений салицилатами брассиностероидов в фазе выхода в трубку оказывает стимулирующее действие на формирование защитных физиологического-биохимических реакций растений. Наиболее активное защитное действие проявил салицилат 24-эпибруссинолида.

Исследовано влияние 24-эпикастастерона (ЭК) и его 2-моносалицилата на солеустойчивость растений арабидопсиса (*Arabidopsis thaliana* L.) дикого типа (Col-0) и трансформированных геном бактериальной салицилатгидроксилазы (*NahG*). Сделано заключение об участии салициловой кислоты в реализации защитного действия брассиностероидов на растения в условиях солевого стресса и перспективности применения 2-моносалицилата в качестве индуктора устойчивости растений [15].

По данным некоторых исследователей, один из возможных путей инактивации БС заключается в их сульфатировании [16]. Однако синтезированные натриевые соли эфиров БС с серной кислотой (натрия 2-, 3-, 22- и 23-моносульфаты и динатрия 2,3-дисульфат) [17] проявили биологическую активность в опытах по влиянию на ростовые параметры и урожайность подсолнечника однолетнего *Helianthus annuus* L. (сорт Гелиос) [18], превышающую активность природных БС. Наибольшее влияние на рост и развитие растений подсолнечника отмечено в условиях полевых опытов, при этом наиболее активным оказался динатрия дисульфат 24-эпибруссинолида.

Осуществлен синтез ряда сложных моно- и диэфиров ИУК и 24-эпибруссиностероидов. Первичный скрининг некоторых из полученных соединений в лабораторных тестах на проростках

пшеницы показал заметную ростостимулирующую активность, которая оказалась выше, чем в контрольных вариантах, а также в опытах с использованием 24-эпибруссинолида (ЭБ) и его смеси с ИУК [19, 20]. Установлено влияние производного брассиностероидов, модифицированного остатком индолил-3-уксусной кислоты (2,22-диэфир ИУК), на регуляцию роста и развития растений *Arabidopsis thaliana* и *Triticum aestivum* в условиях солевого стресса. Показано, что синтезированный эфир обладает повышенной способностью стимулировать рост и развитие клеток растений в условиях засоления, что может быть обусловлено кросс-гормональными взаимодействиями [21]. Учитывая этот факт, а также полученные данные о положительном влиянии 2,3,22,23-тетрапроизводных янтарной кислоты с 24-эпибруссинолидом и 24-эпикастастероном (действие тетрагемисукцинатов в ряде тестов превосходило росторегулирующие эффекты соответствующих брассиностероидов, янтарной кислоты и смеси этих соединений) [22], в настоящей работе мы поставили цель синтезировать 2,3,22,23-тетраиндолил-3-ацетоксипроизводные 24-эпибруссиностероидов, исследовать их росторегулирующую активность на начальной стадии развития яровой пшеницы и влияние на содержание эндогенных брассиностероидов в процессе роста растений пшеницы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Целевые модифицированные 24-эпибруссиностероиды (III) и (IV), содержащие фрагмент ИУК, были синтезированы из известных природных брассиностероидов ЭК (I) и ЭБ (II) обработкой последних ангидридом индолил-3-уксусной кислоты в диоксане в присутствии диметиламинопиридинина (схема 1). Ангидрид получали *in situ* из ИУК обработкой дициклогексилкарбодиимидом в безводном диоксане.

Полученные производные были охарактеризованы методами ^1H - и ^{13}C -ЯМР, ИК-, УФ-спектроскопии и масс-спектрометрии. Образование эфиров ИУК подтверждало присутствием в УФ-спектрах полос поглощения, характерных для остатка ИУК ($\lambda = 220$ и 280 нм). В ИК-спектрах соединений (III) и (IV) отсутствует полоса поглощения гидроксильных групп и наблюдается полоса высокой интенсивности валентных колебаний эфирной кетогруппы ($\nu = 1730 \text{ см}^{-1}$) и полоса

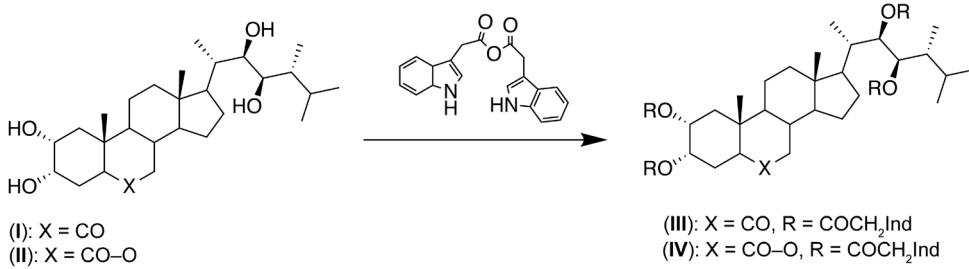


Схема 1. Синтез тетраэфиров индолил-3-уксусной кислоты с 24-брассиностероидами (**III**) и (**IV**). Соединение (**I**) – 24-эпикастастерон, (**II**) – 24-эпивибрассинолид; Ind – индольный остаток.

кетогруппы при C6 ($\nu = 1715 \text{ см}^{-1}$) для соединения (**III**) и 7-окса-6-кетогруппы ($\nu = 1735 \text{ см}^{-1}$) для соединения (**IV**). В спектре ^1H -ЯМР отмечено смещение в более слабое поле ($\delta = 4.85, 5.18, 5.27$ и 5.33 м.д.) сигналов протонов при C2, C3, C22 и C23 по сравнению с исходными тетраспиртами [2], что обусловлено образованием сложноэфирной группировки, а также наличием сигналов 20 протонов индольного остатка ($\delta = 6.92\text{--}7.60 \text{ м.д.}$). В масс-спектрах полученных соединений зафиксированы пики молекулярных ионов, комплексов с катионами протония, а также пики, соответствующие отщеплению остатков ИУК.

Синтезированные соединения исследовали в лабораторных тестах по их влиянию на начальный рост растений яровой пшеницы. Полученные результаты представлены в табл. 1.

На 7-е сутки после опрыскивания 4-дневных растений яровой пшеницы фитогормональные стероиды в большей степени стимулировали накопление биомассы, практически не оказывая влияния на длину побега. Эфиры увеличивали

рост и накопление биомассы в среднем на 7 и 15% соответственно. В то же время, если тетраиндолилацетаты стимулировали рост в большей степени, чем отдельно взятые фитогормоны, то накопление биомассы зависело от концентрации растворов. Например, тетраиндолилацетат 24-эпивибрассинолида (**IV**) в концентрации 10 нМ был более активен при действии на вышеуказанный показатель, чем фитогормон в этой же дозировке, тогда как в концентрации 10 пМ ЭБ способствовал накоплению биомассы в большей степени. Эфир 24-эпикастастерона (**III**) был более активен, чем 24-эпикастастерон в концентрации 10 пМ.

Через 14 сут после обработки конъюгаты также стимулировали рост побегов в длину, однако снижали активность при накоплении биомассы в сравнении с индивидуальными брассиностероидами, кроме варианта с применением тетраиндолилацетата 24-эпивибрассинолида в концентрации 10 нМ. Последний увеличивал оба показателя в большей степени, чем индивидуальный брассиностероид.

Таблица 1. Влияние 24-эпивибрассиностероидов и их тетраэфиров с индолил-3-уксусной кислотой на биомассу растений пшеницы

Вариант опыта	Фаза 2-го листа (7 сут)		Фаза 3-го листа (14 сут)	
	длина побега, % к контролю	сырой вес 10 раст., % к контролю	длина побега, % к контролю	сырой вес 10 раст., % к контролю
Контроль, вода	100	100	100	100
ЭК (I), 10 нМ	103	115	98	113
ЭК (I), 10 пМ	102	111	98	110
ЭБ (II), 10 нМ	100	109	100	102
ЭБ (II), 10 пМ	103	119	104	110
Тетраэфир ЭК (III), 10 нМ	105	110	109	107
Тетраэфир ЭК (III), 10 пМ	111	119	114	106
Тетраэфир ЭБ (IV), 10 нМ	107	113	106	110
Тетраэфир ЭБ (IV), 10 пМ	106	112	107	114

Таким образом, защита всех четырех гидроксильных групп 24-эпибрассиностероидов остатком ИУК не только не приводит к потере активности, но в ряде случаев синтезированные тетраэфиры оказывают большее ростостимулирующее действие на начальном этапе развития растений пшеницы.

Можно было предположить, что одной из причин росторегулирующей активности эфиров могут быть изменения в эндогенном содержании БС под действием синтезированных соединений. С целью проверки такой гипотезы мы провели определение эндогенного содержания трех основных групп БС в исследуемых растениях. Оказалось, что при экзогенной обработке как БС (ЭБ, ЭК), так и их эфирами с ИУК наблюдается значительное повышение эндогенного содержания 24-эпибрассиностероидов (24-эпибрассинолида, 24-эпикастастерона и 6-дезоксо-24-эпикастастерона) по сравнению с контрольным образцом (рис. 1). При этом степень повышения при применении эфира и соответствующего брассиностероида сопоставима, что, вероятно, подтверждает протекание гидролиза при проникновении в клетку и высвобождение брассиностероида. Через 14 сут содержание 24-эпибрассиностероидов во всех обработанных образцах снижается по сравнению с аналогичными (через 7 сут) и стремится к контрольному значению.

На 7-е сутки после обработки повышение эндогенного содержания БС группы брассинолида (брассинолида, кастастерона, 6-дезоксо-кастастерона) происходит только при применении БС

в концентрации 10 нМ, в остальных случаях содержание оставалось на уровне контроля либо незначительно снижалось (рис. 1). Через 14 сут содержание БС ряда брассинолида снизилось в более значительной степени по сравнению с контрольным значением во всех вариантах обработки, за исключением применения 24-ЭБ в обеих концентрациях (содержание осталось на уровне контроля).

Обработка растений пшеницы экзогенным ЭК, а также эфирами БС с ИУК в обеих концентрациях приводила к повышению эндогенного содержания БС ряда 28-гомобрассинолида (28-гомобрассинолида, 28-гомокастастерона и 6-дезоксо-28-гомокастастерона) (рис. 1). В случае использования растворов ЭБ содержание 28-гомобрассиностероидов оставалось на уровне контроля. Однако через 14 сут наблюдалось снижение содержания БС данного ряда в значительной степени при обработке всеми изученными соединениями.

Из полученных данных можно сделать вывод об изменении брассиностероидного профиля в растениях пшеницы на ранних стадиях развития в результате обработки последних брассиностероидами и их эфирами с ИУК. Вероятно, снижение содержания БС рядов брассинолида и 28-гомобрассинолида через 14 сут после экзогенной обработки подтверждает тот факт, что брассиностероиды участвуют в процессах регуляции собственного биосинтеза, поддерживая таким образом стероид-гормональный баланс для оптимального роста и развития растений.

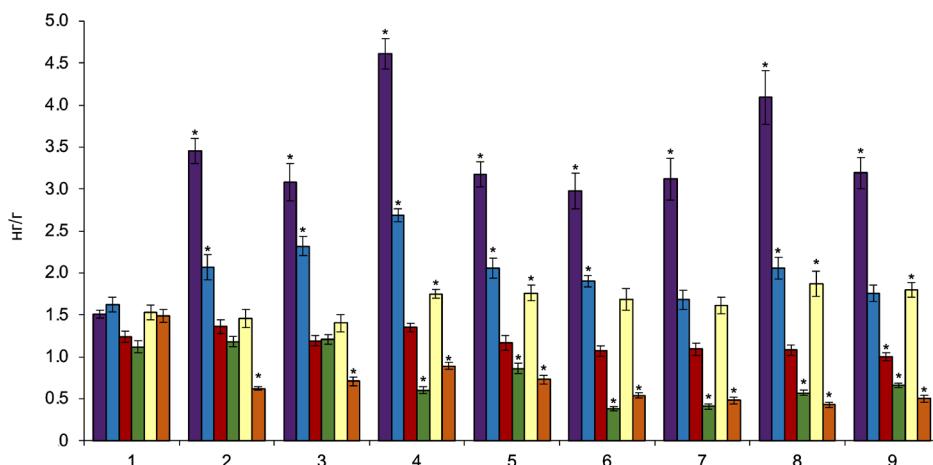


Рис. 1. Содержание 24-эпибрассиностероидов (через 7 (■) и 14 сут (■) после обработки), БС группы брассинолида (через 7 (■) и 14 сут (■) после обработки) и 28-гомобрассиностероидов (через 7 (■) и 14 сут (■) после обработки) в образцах яровой пшеницы: 1 – контроль (вода), 2 – ЭБ, 10 нМ, 3 – ЭБ, 10 пМ, 4 – ЭК, 10 нМ, 5 – ЭК, 10 пМ, 6 – тетраэфир (IV), 10 нМ, 7 – тетраэфир (IV), 10 пМ, 8 – тетраэфир (III), 10 нМ, 9 – тетраэфир (III), 10 пМ. Различия достоверны по сравнению с контролем (* $p \leq 0.05$).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Спектры ^1H - и ^{13}C -ЯМР регистрировали на приборе A-500 (Bruker, Германия; рабочая частота 500 МГц) в дейтерохлороформе с ТМС в качестве внутреннего стандарта, УФ-спектры – на приборе Specord UV VIS (Analytik Jena, Германия) в метиловом спирте, ИК-спектры – на приборе UR-20 (Carl Zeiss, Германия) в пленке, масс-спектры – на приборе LCQTM FLEET с ионной ловушкой (Thermo Electron Corp., США) с использованием гелия в качестве ионизирующего газа и азота в качестве вспомогательного газа. Протекание реакций контролировали методом ТСХ на пластинах Kieselgel 60 F₂₅₄ (Merck, Германия). Хроматографическое разделение реакционных смесей осуществляли на силикагеле 40/60 (Kieselgel 60, Merck, Германия). В работе использовали 24-эпивибрассинолид (**II**) и 24-эпикастастерон (**I**), синтезированные в лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси. ИФА проводили с использованием тест-систем, разработанных и производимых в Институте биоорганической химии НАН Беларуси (ТУ BY 100185129.098-2008).

(22R,23R)-2 α ,3 α ,22,23-Тетра-(3'-индолил-ацетокси)-5 α -эргостан-6-он (III**).** Смесь индолил-3-уксусной кислоты (606 мг, 3.46 ммоль), 1,3-дициклогексилкарбодиимида (356 мг, 1.73 ммоль) в безводном диоксане (3 мл) перемешивали при комнатной температуре в течение 1 ч, затем отфильтровывали осадок, фильтрат и DMAP (10 мол. %) добавляли к (22R,23R)-2 α ,3 α ,22,23-тетрагидрокси-5 α -эргостан-6-ону (**I**) (100 мг, 0.22 ммоль). Полученный раствор перемешивали при комнатной температуре в течение 24 ч. Растворитель упаривали, остаток хроматографировали на силикагеле (элюент – петролейный эфир/этилацетат 1.5 : 1). Получили 146 мг (62%) соединения (**III**) в виде масловидного продукта. УФ-спектр (λ_{max} , нм (ϵ), MeOH): 220 (68 000), 280 (17 600). ИК-спектр (пленка, ν , см⁻¹): 2951, 2874, 1735, 1715. Спектр ^1H -ЯМР (500 МГц, CDCl₃, δ , м.д., J , Гц): 0.46 (с, 3Н, 18-Me), 0.60 (с, 3Н, 19-Me), 0.75 (дд, J 6.3, 5.1, 6Н, 26-, 27-Me), 0.84 (д, J 6.7, 6Н, 21-, 28-Me), 3.51 (д, J 3.0 Гц, 2Н, $-\text{CH}_2-$), 3.63 (с, 2Н, $-\text{CH}_2-$), 3.64 (с, 2Н, $-\text{CH}_2-$), 3.65 (с, 2Н, $-\text{CH}_2-$), 4.85 (м, 1Н, H-23), 5.18 (м, 1Н, H-22), 5.27 (д, J 7.6, 1Н, H-2), 5.33 (д, J 2.3, 1Н, H-3), 6.92 уш. с. (с, 1Н, H-5'), 6.93 уш. с. (с, 1Н, H-5'), 6.94 уш. с. (с, 1Н, H-5'), 7.00

уш. с. (с, 1Н, H-5'), 7.06–7.30 (м, 12Н, H-2',-6', H-7'), 7.60 (дд, J 18.9, 11.6, 7.8, 4Н, H-4'), 8.08 (с, 1Н, NH), 8.16 (с, 3Н, NH). Спектр ^{13}C -ЯМР (125 МГц, CDCl₃, δ , м.д.): 10.92 (к), 11.51 (к), 13.29 (к), 13.45 (к), 17.24 (к), 21.02 (т), 22.55 (к), 23.73 (т), 24.64 (т), 26.93 (д), 27.95 (т), 31.46 (3т), 31.64 (т), 37.3 (д), 37.36 (т), 37.87 (д), 38.76 (т), 38.93 (д), 42.13 (с), 42.52 (с), 46.10 (т), 51.34 (д), 52.53 (д), 52.66 (д), 55.78 (д), 68.88 (д), 69.86 (д), 75.07 (д), 77.655 (д), 108.15 (с), 108.18 (с), 108.59 (с), 108.69 (с), 111.34 (д), 111.45 (д), 111.48 (д), 111.52 (д), 119.02 (2д), 119.21 (2д), 119.69 (д), 119.76 (д), 119.78 (д), 119.83 (д), 122.22 (3д), 122.40 (д), 123.27 (д), 123.49 (д), 123.57 (д), 123.63 (д), 127.38 (4с), 136.23 (4с), 171.17 (с), 171.57 (с), 171.80 (с), 171.96 (с), 211.34 (с). Масс-спектр (APCI), m/z (I_{отн.}, %): 1093 [M + H]⁺ (100), 1092 [M]⁺ (22), 918 [M – ИУК]⁺ (32), 744 [M – 2ИУК]⁺ (22). Найдено: m/z 1093.5709 [M + H]⁺. C₆₈H₇₆N₄O₉ + H. Вычислено: $M + 1$ 1093.5691.

(22R,23R)-2 α ,3 α ,22,23-Тетра-(3'-индолил-ацетокси)-B-гомо-7-окса-5 α -эргостан-6-он (IV**).** Синтез осуществляли по методике, описанной выше. Из 100 мг (0.21 ммоль) (22R,23R)-2 α ,3 α ,22,23-тетрагидрокси-B-гомо-7-окса-5 α -эргостан-6-она (**II**) получили 142 мг (61%) тетраэфира (**IV**) в виде масла. УФ-спектр (λ_{max} , нм (ϵ), MeOH): 220 (97 000), 280 (27 000). ИК-спектр (пленка, ν , см⁻¹): 1735, 1718, 1459, 747. Спектр ^1H -ЯМР (500 МГц, CDCl₃, δ , м.д., J , Гц): 0.46 (с, 3Н, 18-Me), 0.72 (с, 3Н, 19-Me), 0.76 (дд, J 6.9, 2.7, 6Н, 26-, 27-Me), 0.83 (дд, J 8.6, 7.0, 6Н, 21-, 28-Me), 3.52 (д, J 6.7, 2Н, $-\text{CH}_2-$), 3.69 (дд, J 15.6, 5.1, 6Н, 3-CH₂–), 4.76 (ддд, J 12.61, 4.44, 2.47, 1Н, H-23), 5.18 (дд, J 7.5, 4.7, 1Н, H-22), 5.27 (д, J 17.1, 1Н, H-2), 5.28 (д, J 10.8, 1Н, H-3), 6.92 (д, J 2.3, 1Н, H-5'), 6.96 (д, J 2.3, 1Н, H-5'), 7.00 (д, J 2.3, 1Н, H-5'), 7.03 (д, J 2.5, 1Н, H-5'), 6.90–7.34 (м, 12Н, H-2',-6', H-7'), 7.50 (д, J 7.7, 1Н, H-4'), 7.62 (дд, J 15.5, 7.8, 3Н, H-4'), 8.04 (с, 1Н, NH), 8.10 (с, 1Н, NH), 8.14 (с, 1Н, NH), 8.19 (с, 1Н, NH). Спектр ^{13}C -ЯМР (125 МГц, CDCl₃, δ , м.д.): 175.52 (с), 171.85 (с), 171.74 (с), 171.45 (с), 171.00 (с), 136.27 (с), 136.20 (3с), 129.17 (2д), 128.36 (2д), 127.43 (4с), 123.62 (д), 123.50 (д), 123.49 (д), 123.32 (д), 122.45 (д), 122.28 (д), 122.26 (д), 122.20 (д), 119.94 (д), 119.75 (д), 119.23 (д), 119.04 (д), 111.55 (д), 111.48 (д), 111.41 (д), 111.31 (д), 108.79 (с), 108.61 (с), 108.26 (2с), 74.99 (д), 70.14 (д), 69.69 (д), 68.63 (д), 57.15 (д), 52.52 (д), 50.52 (д), 42.16 (2с), 41.52 (д), 38.99 (д), 38.93 (т), 38.72 (т, д), 37.98

(д), 37.92 (т), 31.59 (т), 31.56 (т), 31.42 (3т), 29.01 (т), 27.89 (т), 26.94 (д), 24.52 (т), 22.50 (т), 21.99 (т), 21.58 (к), 17.20 (к), 15.36 (к), 13.26 (к), 11.28 (к), 10.88 (к). Масс-спектр (APCI), m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 1109 [$M + H$]⁺ (100), 1108 [M]⁺ (30), 952 (8), 934 [$M - \text{ИУК}$]⁺ (11). Найдено: m/z 1109.5659 [$M + H$]⁺. $C_{68}H_{76}N_4O_{10} + H$. Вычислено: $M + 1$ 1109.5640.

Ростостимулирующая активность полученных соединений. Лабораторный опыт по изучению влияния БС и их тетраэфиров с ИУК на начальный рост растений проводили на яровой пшенице сорта Весточка. Посев производили сухими семенами. После прорастания (в течение 4 сут) растения обрабатывали однократно растворами БС или их эфиров в концентрациях 10 нМ и 10 пМ путем опрыскивания. В качестве контроля использовали растения, обработанные водой. Длину проростков пшеницы и сырой вес 10 растений определяли в фазе 2-го и 3-го листа. В табл. 1 приведено сравнение средних значений выборок со статистической достоверностью 0.05.

Анализ эндогенного содержания БС в проростках пшеницы на ранней стадии развития растений. Для количественной оценки эндогенного содержания БС методом ИФА надземную часть растений фиксировали при -20°C и лиофильно высушивали. Определение наиболее распространенных и активных БС (группы брассинолида, 24-эпибрасинолида и 28-гомобрасинолида) проводили методом двухстадийного ИФА [23] с использованием разработанных нами ранее и выпускаемых в Институте биоорганической химии НАН Беларуси (ТУ BY 100185129. 178-2020) иммуноферментных тест-систем по описанному в работе [24] методу. Эксперименты повторяли независимо трижды при 3-кратной повторности в каждой серии. Представлены средние значения и их стандартные отклонения. Достоверность различий рассчитывали по t -критерию Стьюдента. Обсуждаются различия, достоверные при $p \leq 0.05$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые синтезированы сложные тетраэфиры ИУК и 24-эпибрасиностероидов. Первичный скрининг полученных соединений в лабораторных тестах на растениях пшеницы показал заметную ростостимулирующую концентрационно-зависимую активность. С использованием ИФА установлено, что под действием 24-эпибрасиностероидов и их эфиров с ИУК изменяется эндогенное содержание трех групп

БС (брассинолида, 24-эпибрасинолида и 28-гомобрасинолида), при этом на разных стадиях развития растений пшеницы эти изменения протекают по-разному. Изменение стероид-гормонального баланса БС у вегетирующих растений при обработке 24-эпибрасиностероидами или тетраэфирами БС с ИУК может свидетельствовать об их участии в процессах регуляции биосинтеза. Полученные производные перспективны для более глубокого изучения, прежде всего, исследования их эффективности в полевых опытах.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Х23РНФ-087).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит описания каких-либо исследований с участием людей и использованием животных в качестве объектов исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – РПЛ и ВАХ; экспериментальные работы – ОПС, НЕМ, АЛС; написание статьи – РПЛ; анализ данных – РПЛ и АЛС; администрирование проекта – ВАХ.

Все авторы дали одобрение на окончательный вариант рукописи.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, подтверждающие выводы настоящего исследования, можно получить у корреспондирующего автора по обоснованному запросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grove M.D., Spencer G.F., Rohwedder W.K., Mandava N., Worley J.F., Warthen J.D., Steffens G.L., Flippin-Anderson J.L., Cook J.C. // Nature. 1979. V. 281. P. 216.
<https://doi.org/10.1038/281216a0>
2. Khrapach V.A., Zhabinskii V.N., de Groot A.E. // Brassinosteroids: a new class of plant hormones. San Diego: Academic Press, 1999. 456 p.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2000.0423d.x>

3. *Bajguz A., Hayat S.* // Plant Physiol. Biochem. 2008. V. 47. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002>
4. *Moon J., Park C.H., Son S.H., Youn J.H., Kim S.K.* // Plant Signal. Behav. 2021. V. 16. P. 1926130.
<https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1926130>
5. *Аевбаев А.М., Юлдашев Р.А., Фатхутдинова Р.А., Урусов Ф.А., Сафтуатдинова Ю.Б., Шакирова Ф.М.* // Прикл. биохимия и микробиол. 2010. Т. 46. С. 99–102.
6. *Bao F., Shen J., Brady S.R., Muday G.K., Asami T., Yang Z.* // Plant Physiol. 2004. V. 134. P. 1624.
<https://doi.org/10.1104/pp.103.036897>
7. *Nolan T.M., Vukašinović N., Liu D., Russinova E., Yin Y.* // Plant Cell. 2020. V. 32. P. 295–318.
<https://doi.org/10.1105/tpc.19.00335>
8. *González D., Fuentes S., Serna L.* // Int. J. Dev. Biol. 2017. V. 61. P. 383–387.
<https://doi.org/10.1387/ijdb.170021LS>
9. *Sun L., Feraru E., Feraru M.I., Waidmann S., Wang W., Passaia G., Wang Z.Y., Wabnik K., Kleine-Vehn J.* // Curr. Biol. 2020. V. 30. P. 1579–1588.e6.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.02.002>
10. *Хрипач В.А., Литвиновская Р.П., Райман М.Э., Минин П.С., Кисель М.А., Тростяник И.В., Долгопалец В.И.* // Пат. РБ 18530 С1, 2010.
11. *Литвиновская Р.П., Вайнер А.А., Жилицкая Г.А., Колупаев Ю.Е., Савочка О.П., Хрипач В.А.* // Химия прир. соед. 2016. Т. 52. С. 394–398.
<https://doi.org/10.1007/s10600-016-1671-y>
12. *Литвиновская Р.П., Шкляревский М.А., Колупаев Ю.Е., Кокорев А.И., Хрипач В.А.* // Прикл. биохимия и микробиол. 2021. Т. 57. С. 605–612.
<https://doi.org/10.31857/S055510992106009X>
13. *Манжелесова Н.Е., Литвиновская Р.П., Полянская С.Н., Корытько Л.А., Савочка О.П.* // Докл. НАН Беларуси. 2019. Т. 63. С. 304–311.
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-304-311>
14. *Manzhalesava N.E., Litvinovskaya R.P., Poljanskaja S.N., Khripach V.A.* // Open Agr. J. 2022. V. 16. P. e2207130.
<https://doi.org/10.2174/18743315-v16-e2207130>
15. *Литвиновская Р.П., Шкляревский М.А., Колупаев Ю.Е., Кокорев А.И., Хрипач В.А., Дмитриев А.П.* // Физиол. раст. 2022. Т. 69. С. 189–197.
<https://doi.org/10.1134/S1021443722020108>
16. *Bajguz A.* // Plant Physiol. Biochem. 2007. V. 45. P. 95–107.
17. *Zhylitskaya H., Chashchina N., Litvinovskaya R., Zavadskaya M., Zhabinskii V., Khripach V.* // Steroids. 2017. V. 117. P. 2–10.
<https://doi.org/10.1016/j.steroids.2016.06.006>
18. *Хомюк Я.В., Литвиновская Р.П., Колбас А.П.* // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук. 2022. Т. 67. С. 181–189.
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2022-67-2-000-000>
19. *Хрипач В.А., Литвиновская Р.П., Райман М.Э., Минин П.С., Аникеев В.И.* // Пат. РБ 14986 С1, 2011.
20. *Литвиновская Р.П., Минин П.С., Райман М.Э., Жилицкая Г.А., Куртикова А.Л., Кожарнович К.Г., Деревянчук М.В., Кравец В.С., Хрипач В.А.* // Химия прир. соед. 2013. Т. 49. С. 408–414.
21. *Деревянчук М.В., Литвиновская Р.П., Савчук А.Л., Хрипач В.А., Кравец В.С.* // Допов. НАН України. 2015. № 3. С. 148–151.
22. *Litvinovskaya R.P., Manzhalesava N.E., Savachka A.P., Khripach V.A.* // Russ. J. Bioorg. Chem. 2022. V. 48. P. 65–69.
<https://doi.org/10.1134/S1068162022030128>
23. *Pradko A.G., Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L., Drach S.V., Baranovsky A.V., Zhabinskii V.N., Mirantsova T.V., Khripach V.A.* // Steroids. 2015. V. 97. P. 78–86.
<https://doi.org/10.1016/j.steroids.2014.08.022>
24. *Манжелесова Н.Е., Литвиновская Р.П., Савчук А.Л., Денисюк Д.В., Хрипач В.А.* // Физиол. раст. 2024. Т. 71. С. 268–279.
<https://doi.org/10.1134/S1021443724606426>

Synthesis of Tetraesters of Indolyl-3-acetic Acid with 24-Epibrassinosteroids and Their Influence on the Initial Growth of Wheat Plants

R. P. Litvinovskaya*, #, N. E. Manzhalesava*, A. P. Savachka*,
A. L. Sauchuk*, and V. A. Khripach*

Phone: +375 (17) 356-56-15; e-mail: litvin@iboch.by

* Institute of Bioorganic Chemistry of National Academy of Science of Belarus,
ul. Kuprevicha, 5/2, Minsk, 220084 Belarus

By treating 24-epibrassinosteroids with indolyl-3-acetic acid (IAA) anhydride in dioxane in the presence of dimethylaminopyridine, their 2,3,22,23-tetra-(3'-indolylacetoxy) derivatives were obtained. It has been shown that brassinosteroid tetraesters of indolyl-3-acetic acid exhibit phytogrowth-regulating activity in the early stages of wheat plant growth. It has been established that treatment with IAA tetraesters leads to a change in the steroid-hormonal balance of brassinosteroids in vegetative plants, which may indicate their participation in the processes of biosynthesis regulation. The obtained derivatives are promising for more in-depth study, primarily for investigating their effectiveness in field experiments.

Keywords: brassinosteroids, IAA, synthesis of 2,3,22,23-tetraesters of IAA and 24-epibrassinosteroids, growth-stimulating activity, ELISA, endogenous content of brassinosteroids